

エマルション, チェンバーによる電磁カスケードシ ャワの電子密度横分布と散乱角分布の研究

著者	渡辺 善二郎
号	445
発行年	1974
URL	http://hdl.handle.net/10097/23911

氏名・(本籍)	わた なべ ぜん じ ろ う 渡 辺 善 二 郎
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	理 第 4 4 5 号
学位授与年月日	昭和49年11月27日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最 終 学 歴	東北大学理学部物理学科卒業
学位論文題目	エマルション, チェンバーによる電磁カスケード シャワーの電子密度横分布と散乱角分布の研究
論文審査委員	(主査) 教 授 森 田 右 教 授 佐 藤 岩 男 教 授 北 垣 敏 男

論 文 目 次

第1章 緒 論

- 第1節 1次宇宙線
- 第2節 2次宇宙線
- 第3節 高エネルギー宇宙線現象
- 第4節 高エネルギー現象実験における困難性
- 第5節 エマルション・チェンバーと本研究の目的

第2章 理論的考察

- 第1節 高エネルギー荷電粒子の物質中での主な過程
- 第2節 光子と物質の相互作用
- 第3節 遮蔽効果と輻射および対創生の確率
- 第4節 Radiation length と臨界エネルギー
- 第5節 電磁カスケードシャワーの拡散方程式
- 第6節 3次元電磁カスケードシャワー理論
- 第7節 Core 近似と相似関係

第3章 実験方法

第1節 Emulsion Chamber

第2節 原子核乾板と N-type film の現像法

第3節 カスケードシャワーの detection

第4節 横分布の測定

第5節 角分布の測定

第4章 実験結果

第1節 Lateral distribution

第2節 角 分 布

謝 辞

参考文献

論文内容要旨

緒 論

1 次宇宙線が大気に入射すると、空気原子核との相互作用により 2 次粒子を発生する。入射粒子のエネルギーが約 10^{12} eV を越えると、中間子の多重発生という特徴的な現象が起る。この中間子の多重発生を通して、超高エネルギー現象における核相互作用の特性を研究する事が、宇宙線研究における最も重要な課題の一つである。

しかし、加速器による高エネルギー相互作用の研究に比して、宇宙線はそのエネルギー領域が高いことで勝っているが、二つの困難性が存在する。第一は、宇宙線強度はそのエネルギーが増加すると、又大気の深さが増加すると急速に減少することである。第二に、高エネルギー宇宙線粒子のエネルギー決定が困難であるということである。

特にエネルギーを確定することは、物理を議論する上で基本的なものであり、その決定法としては乾板上での grain counting 法、散乱法、磁場による軌道曲率から定める方法などがあるが、乾板では数 GeV、霧箱では数十 GeV を越えることが出来ない。又核子-核子衝突で、重心系での前後方対称性を仮定して、1 次粒子のエネルギーを決める Castagnoli の方法もあるが、その仮定の妥当せぬ現象が存在して、正確なエネルギーを決定が困難である。

この困難さを乗り越えたのが、エマルションチェンバー計画である。この初期の実験から 2 次粒子の横運動量が数百 MeV であるという先駆的な仕事がなされている。

エマルション・チェンバーは金属板と原子核乾板とを組合せた検出器で、我国で発展したものである。このチェンバーを用いた実験で測定する最も基本的な物理量として、 π^0 の崩壊から生じた γ 線のエネルギー測定がある。

高エネルギー γ 線は物質中で電子対を創生し、その電子が γ 線輻射を行うことの繰返しによって、 γ 線と電子の数を増加し、あるエネルギーに落ちた γ 線は電子対創性を止めるので、電子と γ 線の数はいくつも増え、最大値を経て次第に減少していく。この過程全体が電磁カスケードシャワーである。

カスケードシャワーの理論的研究としては特に西村純氏の研究が優れており、カスケードシャワー軸附近で、軸から一定距離の範囲内にある電子数を各深さで測定することによっても、もとの γ 線のエネルギー、従って π^0 のエネルギーを定める、いわゆる track counting 法を可能にした。この理論は、カスケードシャワーの中の電子エネルギーを散乱法によって求めた Pinkan の data と比較され、理論と実験の良い一致を見た。

更に我国のエマルション・チェンバーグループによって次のチェックが行われた。 $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$ の崩壊で、2 個の崩壊 γ 線のエネルギーを E_1, E_2 とすれば、チェンバー中での 2 個の γ 線の間の距離を L 、チェンバーと発生点との距離を H として、 $L/H = \theta = m_{\pi^0} C^2 / (E_1 E_2)^{1/2}$ の関係がある。ここで θ は崩壊 γ 線の開きの角、 $m_{\pi^0} C^2$ は π^0 の静止エネルギーである。単一の γ 線が発生し H がわかっている場合には、上の関係式を用いると、カスケードシャワー理論から求めたエネルギーの精度を調べることが出来る。この結果も実験と理論の一致は良い。多数の γ 線がチェンバー中で観測されるのは、チェンバー上方で多数の π^0 が発生した場合に起る。同一核相互作用の

結果生じた π^0 の崩壊 γ 線の集りを family というが、この中で γ 線の対を作ると、各対によって H が求まる。誤差の範囲内で H が一致するように対を作らねばならない。作った対のエネルギー分布の統計的チェックからも、シャワーのエネルギー決定に系統的誤差のないことが示された。

このように西村氏のカスケードシャワー理論は、シャワー軸近傍における電子数測定によって結局 π^0 中間子のエネルギーを決定出来るということになり、超高エネルギー現象でその解析に大きな貢献をすることになった。現在チェンバーの大型化に伴い、シャワーによって X 線フィルム上に生じたスポットの黒化度を測定して、 γ 線のエネルギーを決定する測光法も一般的に採用されてきたが、その較正の規準としては依然 track counting 法がある。

この論文の目的は、カスケードシャワーの実験研究において、エネルギー決定方法の理論的基盤を与えている、B 近似によるカスケードシャワーの 3 次元理論で予測している、電子の横分布と角分布とを実際にエマルジョンチェンバーで観測して、理論との比較検証を行うことにある。

三次元カスケードシャワー理論の概要

相対論的エネルギー領域の荷電粒子の電離損失は、物質の厚さを g / cm^2 で測ると荷電粒子のエネルギーにも、物質にも殆ど依らない。又制動輻射によって光子を放出するが、この輻射損失は Bethe-Heitler により計算され、粒子のエネルギーに比例する。高エネルギー光子においては、光電効果と Compton 散乱は重要ではない。高エネルギー光子の最も重要なエネルギー損失は対創生によるものである。

高エネルギーでは輻射と対創性に対して、完全遮蔽の断面積が適用出来、これは Heitler が計算し、後に Kirpichev と Pomeranchuk が改良している。

従来のカスケードシャワー理論に用いられて来た近似として、「A 近似」があるが、これは輻射と対創性に対して完全遮蔽の断面積を用い、電離損失を無視した近似法である。「B 近似」とは A 近似に電離損失を入れた近似法である。

以上はシャワーの深さについての一次元的発達を取扱っているが、これに対し多重散乱の効果を入れたのが Landau 近似を用いた 3 次元 B 近似によるカスケードシャワー理論である。

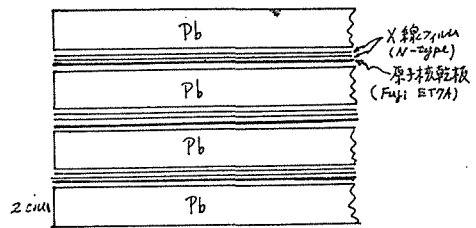
西村氏はカスケードシャワーの横方向の拡がりとして、更に plural scattering を考慮した Moliere の散乱理論を用いて、Landau 近似なしの 3 次元カスケードシャワー理論を展開した。そしてその拡散方程式を関数変換を用いて解析的に求めることに成功した。

この理論で若し core 近似即ち $\varepsilon r / k \ll 1$, (ε : 臨界エネルギーで鉛では 7.4 MeV, K : 散乱定数 $\sim 20 \text{ MeV}$ で、 r は radiation length 単位で測ったシャワー軸からの距離) が成立つような r に対しては、極めてこみ入った理論計算が簡単になり、 r 線のエネルギーが E_0 のとき、深さも radiation length で、軸を中心とし半径 r 内の電子の数は $N(E_0 r / k, t)$ の関係形となり、これが track counting 法の基礎である。

横分布は、シャワー軸から r と $r + dr$ の間にある電子数を $\rho(E_0, r) r dr$ とすると、理論の結果では $\rho(E_0, r) / E_0^2 = g(E_0 r)$ の関数形となることが示された。これが直接実験と比較出来る横分布を与えている。

実験と結果

エマルジョン・チェンバーの基本構造は、第1図に示すように、さくらN-type film 2枚と原子核乾板1枚を鉛板の間に入れたものの繰り返し構造である。これを気球、山上、そして地下で露出した。気球と山上のチェンバーでは、その上方で起った超高エネルギー核相互作用の結果生ずる π^0 中間子の崩壊 γ 線は、チェンバーに入射し、鉛中で電子対の創生から始まるカスケードシャワーを発達させる。地下のチェンバーはエマルジョン面を鉛直に設置され、 μ 中間子のbremsstrahlungによるシャワーが観測出来る。



第1図

X線フィルム上では大きいカスケードシャワーは肉眼で黒点として見つけることが出来る。電子数を測定するにはその直下の原子核乾板について顕微鏡によって行う。

このようなエマルジョン・チェンバーの露出で見出されたシャワーの中、気球による5例、山上での21例、地下での μ 中間子による大シャワー2例、エネルギー範囲が0.7TeVから45TeVに亘る、合計28例のシャワーが本論文での対象となった。

横分布の測定は、原子核乾板を総合倍率が1350倍（ μ 中間子によるシャワーでは1500倍）で、シャワー軸から距離 r のところの電子数を測定して密度を求める。このような測定を深さ t と距離 r を変えて行った。

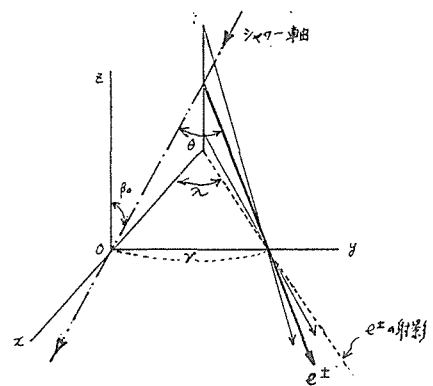
横分布はcore近似では前の式から結局、 $\rho(\delta E_0, r/\delta) = \delta^2 \rho(E_0, r)$ で表わされるので、従って、エネルギーが E_0 の γ 線によって始まるカスケードシャワーの電子の横分布 $\rho(E_0, r)$ が、いろいろな深さで計算されておれば、任意のエネルギー δE_0 の横分布が求められる。

西村氏はこれを $E_0 = 10^{13} \text{ eV}$ について計算した。深さは2 radiation length から20 radiation length まで2 radiation length おきに求められた。実験はこの理論曲線と比較された。

角分布の測定は総合倍率1500倍で第2図に示すように、乾板面上でのシャワー軸と電子との間の射影角 λ を測定し角度 θ に変換することで求めた。

シャワー理論では横分布は θ について積分された形で表わされ、角分布は r について積分された形で表わされており、又core近似では、 r を θ でおきかえて角分布 $N(<\theta)$ が得られる形をとっている。これは角分布についても相似関係が成立っていることを示している。

実際に測定出来るのは、深さ t 、軸からの距離 r での角分布であって、このようなシャワー理論の計算はまだ行われていない。ここでは t と r を



第2図

変数とする角分布をとって、相似関係を調べた。

以上の実験から確認されたことは次の通りである。

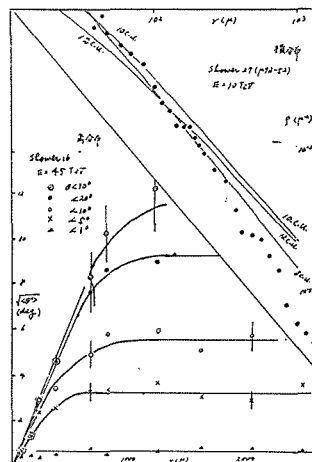
(1) 約8TeV までは、B近似によるシャワー粒子の空間分布の理論的計算結果と、シャワー発達のおくれを較正した後での実験値とは約500 μ 以内では、ほぼ理論値と一致している。

(2) Track counting 法による遷移曲線が最大値を過ぎてから理論値よりもゆっくり下がるシャワーは、横分布では軸から遠距離では理論値より下回る。このようなシャワーは、核相互作用による可能性がある。

(3) 約8TeV 以上のシャワーでは、約500 μ 以遠では理論値に比し実験結果は粒子密度が低く出る傾向がある。これは核相互作用による複合カスケードか、特に高エネルギーシャワーでは Landau 効果を考える必要がある。

(4) 軸から一定距離でのシャワー粒子の平均散乱角は、初め軸からの距離と共に直線的に増加する。

(5) 軸近くでは、散乱角と分布との間に相似関係が成立していると思われる。(以上)



第3図・第4図

論文審査の結果の要旨

本論文は超高エネルギー領域における電磁カスケードシャワーをエマルジョンチェンバーによって測定し、その結果を理論計算と比較検討したものである。エマルジョンチェンバーは、X線フィルム2枚と原子核乾板1枚を鉛板の間に入れ、これを幾層も重ねたもので、気球、山上、地下で露出した。高エネルギー γ 線によって発生した大きいカスケードシャワーは、X線フィルム上に黒点として肉眼で見出される。全体で28例の大シャワーが観測され、これに対応する原子核乾板を顕微鏡で走査し、シャワーで発生した電子数をシャワー軸からの距離、および深さの関数として測定し、これからシャワー電子数の横分布と角分布を求めた。これらのシャワーのエネルギーは0.7TeV ($1\text{TeV}=10^{12}\text{eV}$) から45TeV にわたっている。

一方、高エネルギーの電磁カスケードシャワーの理論としては、輻射損失と電子対創生だけを考慮したA近似と、電離損失も考慮したB近似、さらに多重散乱の効果を考慮した3次元B近似がある。こゝでは最も近似のよい3次元B近似を用いてシャワー電子数の横分布と角分布を計算して実験結果と比較した。その結果、シャワー軸近傍ではよくコア近似がなりたち、理論と実験はよく一致するが、シャワー軸から遠距離では、電子密度の実験結果は理論値よりも低くなることが判明し、核相互作用による複合カスケードなどの影響を考慮しなければならないことがわかった。

もともと、宇宙線による高エネルギー現象の研究は、加速器による研究に比べて特に高いエネルギーの現象、例えば中間子の多重発生などの現象を調べられるのが特徴であるが、粒子の強度が小さいことと、エネルギーの決定がむづかしいのが欠点である。特にTeV以上のエネルギー領域では、粒子エネルギーの測定法が確立されていない。その中でエマルジョンチェンバーによる方法は最も信頼できるものとされている。すなわち π^0 中間子の崩壊で生じた γ 線が金属板中で電磁カスケードシャワーを発生し、このシャワー電子数分布を原子核乾板で測定することによってもとの γ 線のエネルギーを求め、それから π^0 中間子のエネルギーを決定する方法である。

したがって本論文は高エネルギー γ 線の電磁カスケードシャワーの機構を解明するだけでなく、超高エネルギー粒子のエネルギー測定に寄与するところ大きく、よって渡辺善二郎提出の論文は理学博士の論文として合格と認める。